农牧交错带不同利用方式土壤粒径分布特征
——以呼和浩特市武川县为例

付东升[1]， 任晓萌[2]， 王燕玲[3]， 张翠英[4]， 蒙仲举[1]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2. 内蒙古自治区气象科学研究所，内蒙古 呼和浩特 010051；3. 锡林郭勒盟水利局水利事业发展中心，内蒙古 锡林浩特 026099；4. 内蒙古乌兰察布市四子王旗吉生太镇，内蒙古 乌兰察布 011826）

摘 要：以呼和浩特市武川县不同农田和天然草地为研究对象，采用野外原位监测和室内试验结合的方法，对典型小麦留茬地、葵花留茬地、翻耕地、退耕地4种农田土壤进行研究，并通过分析平均粒径、标准差、偏度、峰度，对不同利用方式下土地抗风蚀能力进行探讨。研究结果表明：(1) 研究区土壤以细砂、极细砂和粉粒为主，占比达80%~85%。(2) 土壤粒度组成由细到粗为：翻耕1 a > 天然草地 > 翻耕边坡 > 小麦留茬 > 翻耕15 a > 退耕5 a > 葵花留茬，沙粒平均粒径为2.12~2.61。(3) 各层土壤分选性较差，偏度均表现为正偏且近于对称，峰度属于宽平态。土壤易风蚀颗粒粒径范围在200~400 μm。(4) 与天然草地相比，农田垦殖利用导致土壤粒径分布范围扩大，粒径整体趋于粗粒化。

关键词：农牧交错带；农田；土壤粒径；耕作方式；武川县

内蒙古阴山北麓是我国最具代表性的半干旱半湿润过渡带之一[1]，其荒漠化发展最快、生态环境最为脆弱，该区同时也是我国中东部地区的“生态屏障”[2]，具有生态和生产的双重功能[3]。而近半个世纪以来，该区域“重农轻牧”、“重生产轻生态”[4]，加之该区域气候干旱、水资源短缺、秋冬时期正值大风季节，原始的耕作方式使表层土壤疏松，土壤被风蚀破坏，使地表耕层变薄，养分流失，土壤肥力大大降低[5-6]，长期水土流失造成巨大的生态破坏和经济损失，使得该区域成了典型的风蚀荒漠化区[7]。武川县地处内蒙古阴山北麓农牧交错带中部，是荒漠化发展最快、生境最为脆弱，属于典型的风蚀沙化区，南部为山区；中部为高原区，农牧业相互重叠(农业为主)，风蚀严重；北部为天然草地，农牧混合(牧业为主)，草地退化明显。由于该区域长期采用传统耕作方法，许多农田处于中强度风蚀，严重制约区域可持续发展。近些年来，国家实施的一系列退耕(牧)还林(草)政策对农牧交错带生态恢复产生了深远影响。

粒径作为土壤的一个稳定的自然属性[8-11]，在判断土壤可蚀性[12-13]、反映风沙环境变化[14-17]、决定风蚀强度[18]、确认土地荒漠化程度[19]等方面都有着重要的地位，还可以间接表征复杂环境中土壤的变化过程[20]，反映土壤侵蚀的现状[21-23]。土壤风蚀的过程最主要是土壤中的细小颗粒被风逐渐吹蚀沙化的过程[24-25]。不同的耕作方式导致地表覆盖度和粗糙度出现了明显的差异，进而影响土壤粒级分布[26-27]。邱捷等[28]研究发现，不同土地利用类型间分形维数存在显著差异，与各粒径级颗粒之间均呈显著相关关系。崔晓[29]研究表明，春翻留茬10 cm覆盖和春翻还田措施可改善土壤部分物理性质，在一定程度上减小农田的土壤风蚀。风季后土壤黏粒和粉粒含量较风季前增加较为明显，最高增加10%以上。王少博等[21]指出在长期实施保护性耕作措施下，免耕秸秆还田对比翻耕农田明显增加了土壤黏粒含量，土壤结构稳定性得到增强，深松秸秆还田使土

收稿日期：2021-09-23； **修订日期**：2021-11-25
基金项目：国家自然科学基金(42067015)；内蒙古自治区自然科学基金(2020MS03038)
作者简介：付东升(1996-)，男，硕士研究生，主要从事水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: 1145058064@qq.com
通讯作者：蒙仲举. E-mail: mengzhongju@126.com

壤的均匀性变差。因此，利用土壤粒度组成评价区域农田土壤风蚀和土地退化程度，反映不同耕作方式下土壤风蚀的差异是可行的[30]。

鉴于此，本研究基于武川县农牧试验区，以不同耕作方式下农田土壤为研究对象，天然草地为对照实验，分析粒度参数和粒度频率曲线在不同耕作方式下的变化规律，旨在确定阴山北麓武川县农牧交错带适宜的耕作模式，为该地区耕作农田土壤的改善治理以及农业的可持续发展提供有参考价值的理论、实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于希拉穆仁草原向呼和浩特市过渡区域，地理坐标为110°31′~111°53′E、40°47′~41°23′N，属中温带大陆性季风气候，日照充足，昼夜温差大，冬季长，夏季短且全年都处在一个凉爽的环境，降水主要集中在6—9月，年平均降水量300 mm，风沙活动频繁。正北风和西北风为该地区主风向，年均风速为4.5 $m\cdot s^{-1}$左右，年大风日数为65 d左右[31]，大多在春季。土壤主要以栗钙土、灰褐土、石质土为主，多孔性、结构性差，有机质含量低于2%。天然植被组成结构简单，主要以冷蒿(*Artemisia frigida*)、沙生针茅(*Stipa glareosa*)、大针茅(*Stipa grandis*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)等草本植物为主，适宜栽培一年一熟小日期农作物，主要旱作农作物为马铃薯(*Solanum tuberosum*)，莜麦(*Avena chinensis*)和荞麦(*Fagopyrum esculentum*)[32]。该区为典型农牧交错带，土地利用类型多样且侵蚀严重，包括有不同年限翻耕种植作物、天然草地、弃耕撂荒样地。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选取与样品采集　基于相似可比原则，研究区地势平坦，东西走向，由北向南依次为：天然草地(CK)、小麦翻耕1 a、小麦留茬、小麦翻耕15 a、葵花留茬样地以及退耕5 a，各样地之间无明显边界，考虑到边际效应，于2020年10月中旬，分别在各样地中部采样，其中在小麦翻耕1 a与天然草地边界裸露剖面增加样点，每样点重复3次，分别采集0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~30 cm深度土层土样，将取回的土样在实验室铺开，自然风干后，采用激光粒度仪分析Mastersizer 3000测定土层粒度组成。研究样地基本情况如表1、图1所示。

1.2.2 土样指标测定　去除根系、凋落物等杂质后，过2 mm筛，加入30%体积分数的H_2O_2去除土壤中的有机质；加入10%体积分数的HCl溶液煮沸去除土壤中的碳酸盐；加入稀释液离子水静置12 h，去除上清液，重复稀释至pH值在6.5~7.0之间；土壤粒径体积分数采用激光粒度分析仪测定。在本实验中，根据美国制分级标准将土壤粒径分为：黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.005 mm)、极细砂(0.005~0.01 mm)、细砂(0.01~0.25 mm)、中砂(0.25~0.5 mm)、粗砂(0.5~1.0 mm)、极粗砂(1.0~2.0 mm)共7级。计算对应的累积体积分数为5%、16%、25%、50%、75%、84%、95%的土壤粒径用以计算粒度参数。用到的粒度参数模型如下：

采用伍登(1889年)–温德华(1922年)粒级标准，根据克鲁宾(1934年)对数转化法计算Φ值，公式如下。

$$\Phi = -\log_2 d \qquad (1)$$

式中：d为土壤颗粒粒径(mm)。

Φ_5、Φ_{16}、Φ_{25}、Φ_{50}、Φ_{75}、Φ_{84}、Φ_{95}是克伦拜因(1957年)和福克(1955年)根据累积频率分布曲线的累积百分比，分别为5%、16%、25%、50%、75%、84%、95%对应的粒度进行对数转化所取得的值，据此计算粒度特征参数，公式如下。

平均粒径(d_0)：反映土壤粒度平均状况的参

表1　试验地点的地类概况

Tab. 1　Overview of the experimental site

样地类别	地类及地表情况
翻耕地	分为1 a、15 a翻耕地，垄向东西走向，垄向与主风向30°夹角
小麦留茬地	留茬方向东西向，留茬高度25 cm，盖度75%左右，地上秸秆较多
葵花留茬地	留茬方向东西向，留茬高度90 cm，盖度20%左右，地上无秸秆
翻耕边坡	天然草地与新开垦农田交汇处出现的剖面，约50 cm高，无植被覆盖
退耕地	地表有大量草本植物，平均高度10 cm，有少量砾石，退耕5~6 a，有放牧
天然草地(CK)	具有针茅等草本植物生长，平均高15 cm


天然草地


开垦边坡


翻耕1 a


翻耕15 a


葵花留茬


小麦留茬


退耕5 a

图1 观测地类

Fig. 1 Observational soil classes

数。计算公式为：

$$d_0=\frac{1}{3}(\Phi_{16}+\Phi_{50}+\Phi_{84}) \tag{2}$$

标准偏差(σ_0)：反映土壤粒径分布的分散程度，计算公式为：

$$\sigma_0=\frac{1}{4}(\Phi_{84}-\Phi_{16})+\frac{1}{6.6}(\Phi_{95}-\Phi_5) \tag{3}$$

偏度(S_0)：反映了土壤粒度分布的对称性，计算公式为：

$$S_0=\frac{\Phi_{16}+\Phi_{84}-\Phi_{50}}{2(\Phi_{84}-\Phi_{16})}+\frac{\Phi_5+\Phi_{95}-\Phi_{50}}{2(\Phi_{95}-\Phi_5)} \tag{4}$$

峰度(K_0)：反映土壤粒度集中程度，计算公式为：

$$K_0=\frac{\Phi_{95}-\Phi_5}{2.44(\Phi_{75}-\Phi_{25})} \tag{5}$$

具体分级标准如表2。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式下土壤粒度组成与粒径分布特征

土壤颗粒作为土壤组成中不可或缺的一部分，伴随着作物的生长，在土壤演替过程中，起着极其重要的作用[33-35]。由表3可知，0~5 cm表层土壤粒度组成以砂粒和粉粒为主，黏粒含量极低，其体积百分含量在2.04%~3.36%，粉粒体积百分含量变化范围在22.26%~32.63%；砂粒中，粒径为0.1~0.25 mm的细砂粒最多，其体积百分含量平均为35.3%，其次是极细砂，中砂和较少粗砂。在各样地5~10 cm土层深度中，不同耕作方式下的农田土壤粒径变化很大，以砂粒和粉粒为主，其中细砂粒最多，体积百分含量平均为32.95%，在25.81%~37.11%之间变

表2 粒度参数分级标准

Tab. 2 Classification standards of particle size parameters

标准偏差σ_0		偏度S_0		峰度K_0	
分选级别	取值范围	偏度等级	取值范围	峰度等级	取值范围
分选极好	$\sigma_0\leqslant 0.35$	极负偏	$-1.0\leqslant S_0\leqslant -0.3$	很宽平	$K_0\leqslant 0.67$
分选好	$0.35<\sigma_0\leqslant 0.50$	负偏	$-0.3\leqslant S_0\leqslant -0.1$	宽平	$0.67<K_0\leqslant 0.90$
分选较好	$0.50<\sigma_0\leqslant 0.71$	近于对称	$-0.1\leqslant S_0\leqslant 0.1$	中等	$0.90<K_0\leqslant 1.11$
分选中等	$0.71<\sigma_0\leqslant 1.00$	正偏	$0.1\leqslant S_0\leqslant 0.3$	尖窄	$1.11<K_0\leqslant 1.56$
分选较差	$1.00<\sigma_0\leqslant 2.00$	极正偏	$0.3\leqslant S_0\leqslant 1.0$	很尖窄	$1.56<K_0\leqslant 3.00$
分选差	$2.00<\sigma_0\leqslant 4.00$			极尖窄	$K_0>3.00$
分选极差	$\sigma_0>4.00$				

表3 不同耕作方式下0~30 cm土壤粒度分布

Tab. 3 Distribution of soil grain size in 0−30 cm under different tillage methods

土层深度/cm	样地	土壤粒度分级/%					
		粗砂粒 1000~500 μm	中砂粒 500~250 μm	细砂粒 250~100 μm	极细砂粒 100~50 μm	粉粒 50~2 μm	黏粒 < 2 μm
0~5	天然草地	1.36±0.03bc	11.23±0.26bc	34.78±0.36cd	25.43±0.61a	25.16±0.54c	2.04±0.01e
	翻耕边坡	1.26±0.04bcd	10.51±0.32c	32.92±0.61d	24.52±0.52a	28.15±0.60b	2.64±0.18bc
	翻耕1 a	1.37±0.05bc	10.76±0.28bc	30.63±0.33e	21.50±0.36bc	32.39±1.01a	3.35±0.18a
	翻耕15 a	1.95±0.03b	14.24±0.49a	36.85±1.10abc	20.83±0.31c	23.57±0.19cd	2.55±0.11bcd
	小麦留茬	0.60±0.07d	10.37±0.38c	37.49±0.78ab	25.76±0.52a	23.66±0.53cd	2.11±0.00de
	葵花留茬	0.82±0.10cd	12.21±0.82b	38.51±0.62a	22.82±0.42b	22.80±0.70d	2.85±0.05b
	退耕5 a	3.01±0.56a	13.85±0.46a	35.45±0.52bc	21.86±0.06bc	23.55±0.63cd	2.28±0.29cde
5~10	天然草地	1.73±0.12b	15.33±0.46a	34.14±0.33b	18.52±0.65d	27.29±0.63c	2.99±0.45bc
	翻耕边坡	1.13±0.06c	11.80±0.48b	35.23±0.64b	22.31±0.36b	26.81±0.65c	2.72±0.06bc
	翻耕1 a	1.44±0.04bc	10.60±0.35c	30.59±0.81c	20.39±0.72c	33.77±0.28b	3.21±0.12b
	翻耕15 a	1.40±0.08bc	11.48±0.34bc	34.43±0.57b	24.24±0.66a	25.80±0.32c	2.64±0.11bc
	小麦留茬	2.73±0.30a	12.38±0.12b	25.68±0.34d	17.61±0.12d	37.28±0.12a	4.33±0.04a
	葵花留茬	1.83±0.08b	12.48±0.31b	33.64±0.22b	22.08±0.07bc	26.69±0.21c	3.28±0.44b
	退耕5 a	2.32±0.20a	15.80±0.34a	37.31±0.32a	20.71±0.77bc	21.58±1.50d	2.27±0.03c
10~20	天然草地	1.33±0.06bc	10.48±0.07c	29.58±0.37d	21.29±0.03cd	34.76±0.27a	2.56±0.01bc
	翻耕边坡	1.34±0.04bc	10.48±0.34c	32.65±0.41c	24.66±0.76a	28.05±0.44bc	2.82±0.18ab
	翻耕1 a	0.79±0.04c	12.19±0.49bc	36.45±0.29b	22.57±0.28bc	25.64±0.43c	2.36±0.07bcd
	翻耕15 a	1.19±0.08bc	12.08±0.16bc	32.56±0.51c	21.33±0.44cd	29.60±0.19b	3.24±0.12a
	小麦留茬	1.22±0.22bc	12.94±1.78bc	38.83±0.92a	24.03±0.89ab	21.17±1.99d	1.81±0.01d
	葵花留茬	2.28±0.17a	15.69±0.41a	37.11±0.14b	20.91±0.43cd	21.80±0.72d	2.21±0.12cd
	退耕5 a	1.56±0.33b	13.39±0.84ab	35.67±0.45b	20.51±0.55d	26.66±0.12c	2.21±0.38cd
20~30	天然草地	1.24±0.09b	12.26±0.72a	32.15±0.54d	17.37±0.62c	34.34±0.97a	2.64±0.56a
	翻耕边坡	1.33±0.05b	11.08±0.14ab	34.49±0.58bc	23.17±0.49ab	26.84±0.94c	3.10±0.22a
	翻耕1 a	0.64±0.04c	10.01±0.18b	32.79±0.68cd	22.33±0.66b	31.26±0.34b	2.96±0.10a
	翻耕15 a	1.76±0.04a	12.59±0.54a	36.17±0.55b	22.38±0.54b	24.52±0.72cd	2.59±0.11a
	小麦留茬	0.73±0.06c	11.76±0.69ab	40.39±1.12a	24.20±0.25a	21.11±0.80e	1.82±0.02b
	葵花留茬	1.41±0.10b	12.49±1.19a	38.82±0.54a	22.16±0.21b	22.54±0.50de	2.57±0.06a
	退耕5 a	0.71±0.07c	8.02±0.20c	29.50±0.36e	22.78±0.47ab	36.18±0.93a	2.81±0.08a

注:不同小写字母表示同一土层不同耕作方式下土壤各粒度组成之间差异显著($P<0.05$)。下同。

动;粉粒平均体积百分含量为28.44%,在21.58%~37.28%之间变动。黏粒含量整体相比较上一层整体出现了小幅度的增加,平均体积百分含量增加了0.4%。其中小麦留茬地粉粒含量比同层葵花留茬地多10.59%,较表层多13.65%。退耕5 a粗砂粒含量为2.71%,高于其他各类样地,相比较天然草地高出0.9%。在不同耕作方式下农田各样地10~20 cm土层深度中,土壤颗粒各粒径含量相比上一层(5~10 cm)趋于均匀,总体上颗粒物要比上一层的粗化,其粒径变粗。该土壤深度中粉粒含量明显减少,在天然草地中占34.43 %,在翻耕15 a农田中占29.37%,但在小麦留茬地中约占21.88%。退耕5 a中粉粒含量26.64%相比翻耕1 a农田高出0.88%,低于翻耕15 a农田2.73%。20~30 cm土层中,留茬地粉粒平均体积百分含量比退耕5 a低14.54%。同时,退耕5 a砂粒含量整体也低于其他耕地,其中细砂粒含量占比29.79%,粗砂粒仅约占0.75%。

2.2 不同耕作方式下土壤粒度参数特征

平均粒径表征土壤粒度的平均分布情况,颗粒的平均粗细大小,代表着搬运作用营力的平均动能,颗粒大小反映土壤发育程度和物质来源。由表4可知,农田土表层0~5 cm中,各样地间平均粒径差别不大,范围在2.21~2.50;其中翻耕1 a > 翻耕边坡 > 天然草地 > 留茬地 > 退耕5 a > 翻耕15 a;在5~

表4 同一土层不同耕作方式下土壤粒度参数特征

Tab. 4 Characteristics of soil grain size parameters under different tillage methods in the same soil layer

土层深度/cm	样地	平均粒径 $d_0(\Phi)$	标准偏差 σ_0	偏度 S_0	峰度 K_0
0~5	天然草地	2.33±0.01c	1.26±0.00b	0.15±0.01b	0.78±0.01a
	翻耕边坡	2.42±0.01b	1.27±0.01b	0.08±0.01c	0.75±0.01a
	翻耕1 a	2.50±0.02a	1.30±0.00a	0.00±0.02d	0.72±0.00b
	翻耕15 a	2.21±0.00de	1.30±0.01a	0.23±0.01a	0.77±0.00c
	小麦留茬	2.31±0.02c	1.23±0.00c	0.20±0.01b	0.78±0.00a
	葵花留茬	2.24±0.02d	1.26±0.01b	0.25±0.01a	0.79±0.00a
	退耕5 a	2.22±0.02e	1.29±0.02a	0.23±0.01a	0.78±0.01a
5~10	天然草地	2.26±0.02d	1.33±0.01b	0.15±0.01ab	0.73±0.01a
	翻耕边坡	2.33±0.01c	1.28±0.01d	0.08±0.01bc	0.75±0.02a
	翻耕1 a	2.52±0.03b	1.30±0.00c	0.00±0.03d	0.72±0.04a
	翻耕15 a	2.33±0.01c	1.27±0.01d	0.23±0.02c	0.77±0.01a
	小麦留茬	2.58±0.00a	1.37±0.01a	0.20±0.01ab	0.71±0.02a
	葵花留茬	2.33±0.01c	1.30±0.00c	0.25±0.00a	0.75±0.02a
	退耕5 a	2.12±0.03e	1.33±0.01c	0.23±0.00a	0.80±0.01a
10~20	天然草地	2.53±0.01a	1.29±0.00b	−0.05±0.01c	0.72±0.00b
	翻耕边坡	2.33±0.02b	1.28±0.01c	0.18±0.02b	0.75±0.00b
	翻耕1 a	2.31±0.01c	1.26±0.00c	0.22±0.00a	0.75±0.00b
	翻耕15 a	2.41±0.01b	1.30±0.00ab	0.10±0.01b	0.73±0.00b
	小麦留茬	2.22±0.07cd	1.24±0.01d	0.25±0.02a	0.80±0.03a
	葵花留茬	2.14±0.02d	1.31±0.00a	0.23±0.01a	0.80±0.01a
	退耕5 a	2.28±0.03c	1.31±0.01ab	0.22±0.00a	0.74±0.00b
20~30	天然草地	2.47±0.04b	1.31±0.00a	0.01±0.04c	0.70±0.00d
	翻耕边坡	2.39±0.02c	1.28±0.01bc	0.13±0.02b	0.75±0.01c
	翻耕1 a	2.48±0.01b	1.27±0.00bc	0.05±0.01c	0.72±0.00d
	翻耕15 a	2.26±0.00d	1.28±0.01b	0.22±0.00a	0.77±0.01bc
	小麦留茬	2.20±0.02d	1.23±0.01e	0.25±0.01a	0.83±0.01a
	葵花留茬	2.22±0.02d	1.28±0.01c	0.25±0.00a	0.79±0.01b
	退耕5 a	2.61±0.02a	1.25±0.00d	−0.09±0.02d	0.71±0.00d

10 cm土层中，不同耕作方式间变化范围在2.12~2.58，小麦留茬地最高，退耕5 a较上一土层出现了粒度粗化的情况；在10~20 cm土层中，各耕作方式间差异较大，变化范围在2.14~2.41之间，留茬地整体要低于翻耕地，翻耕15 a＞翻耕1 a＞小麦留茬＞葵花留茬；在20~30 cm土层中，退耕5 a平均粒径最高，其值为2.61，翻耕1 a样地要高于天然草地与留茬地，其值为2.48。

不同耕作方式下各样地的标准偏差在1.23~1.37，根据分级标准可知，研究区各样地在0~30 cm土层内，整体分选较差。在0~5 cm土层中，翻耕15 a＞退耕5 a＞天然草地＞留茬地，其中翻耕15 a最高，与天然草地仅相差0.04；在5~10 cm土层中，小麦留茬地最高，值为1.37，并且此土层整体要高于上一土层；在10~20 cm土层中，葵花留茬＞退耕5 a＞翻耕地＞小麦留茬，其值为1.31；在20~30 cm土层中，整体要低于上一土层，其中天然草地1.31达到了此土层中的最大值，留茬地分选性要低于翻耕地。

不同耕作措施下的各样地偏度介于−0.09~0.25，总体上土壤偏度为正偏，细粒物质占比大于粗粒物质。在0~5 cm土层中，翻耕边坡与翻耕1 a偏度接近对称，其余样地偏度均为正偏；在5~10 cm土层中，小麦留茬偏度为负偏，翻耕1 a偏度接近对称，其余样地偏度均为正偏；在10~20 cm土层中，天然草地、翻耕15 a偏度接近对称，其余样地偏度均为正偏；在20~30 cm土层中，天然草地、翻耕1 a、退耕5 a偏度接近对称，其余样地偏度均为正偏。

整体上各样地峰度值介于0.70~0.83,所对应的峰度等级标准均为宽平态。在0~5 cm土层中,翻耕地峰度低于其他样地峰度,最小值为0.72;在5~10 cm土层中,退耕5 a峰度值为0.80高于其他样地,土壤粒度分布较为分散;在10~20 cm土层中,峰度值留茬地 > 退耕5 a > 翻耕地,与天然草地相差0.09;在20~30 cm土层中,小麦留茬地峰度值最大,为0.83,退耕5 a峰度最小,为0.71,相比较其他样地更为分散。

2.3 不同耕作方式下土壤粒度曲线特征

2.3.1 土壤粒度频率分布特征 由图2可知,在0~5 cm土层内,翻耕1 a样地的粒度频率曲线呈双峰态分布,峰值高度差异不大,第1个峰的峰值位于30~50 μm范围内,第2个峰的峰值位于200~250 μm范围内;在5~10 cm土层内,翻耕1 a样地的粒度频率曲线与0~5 cm土层内基本一致,天然草地与小麦留茬地的粒度频率曲线呈双峰态分布,小麦留茬地主峰位于30~50 μm范围内,天然草地主峰位于200~300 μm范围内;在10~20 cm土层内,小麦留茬地峰值的高度均高于其他样地,峰值位于200~250 μm范围内;在20~30 cm土层中,天然草地、退耕5 a、翻耕1 a呈现不同程度的双峰态分布,其中退耕5 a主峰值高度最高,位于30~45 μm范围内,其余样地呈单峰分布,峰值位于105~120 μm范围内。

2.3.2 土壤粒度累积频率分布特征 由图3可知,同一土层不同耕作方式下土壤的粒度累积频率分布曲线,各样地的曲线斜率相近,曲线的陡度表示颗粒分布的均匀性。各土层曲线均在100~120 μm间逐渐变陡。在0~5 cm表层,翻耕1 a农田分布最均匀,细粒较多;在5~10 cm土层中,葵花留茬地与翻耕15 a地颗粒分布相近,小麦留茬地颗粒组成最细,且退耕5 a曲线坡度最小;在10~20 cm土层中,翻耕15 a农田与翻耕边坡颗粒分布均匀程度相似,略低于分布最均匀的天然草地,开始各曲线均呈现缓慢增长变化,在100 μm左右曲线大幅变陡,且迅速升高至累积体积百分含量达95%,说明土壤颗粒

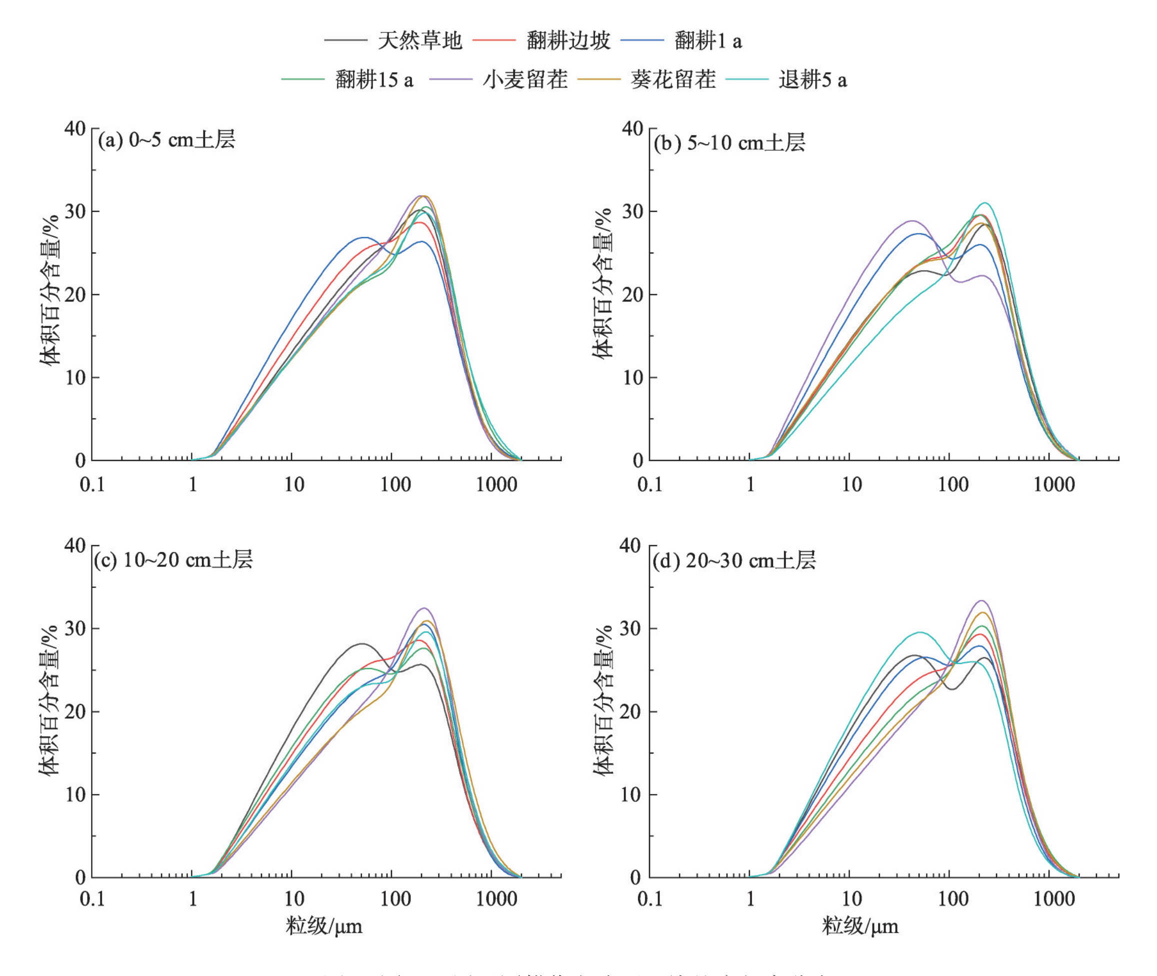


图2 同一土层不同耕作方式下土壤粒度频率分布

Fig. 2 Frequency distribution curve of soil grain size under different tillage methods in the same soil layer

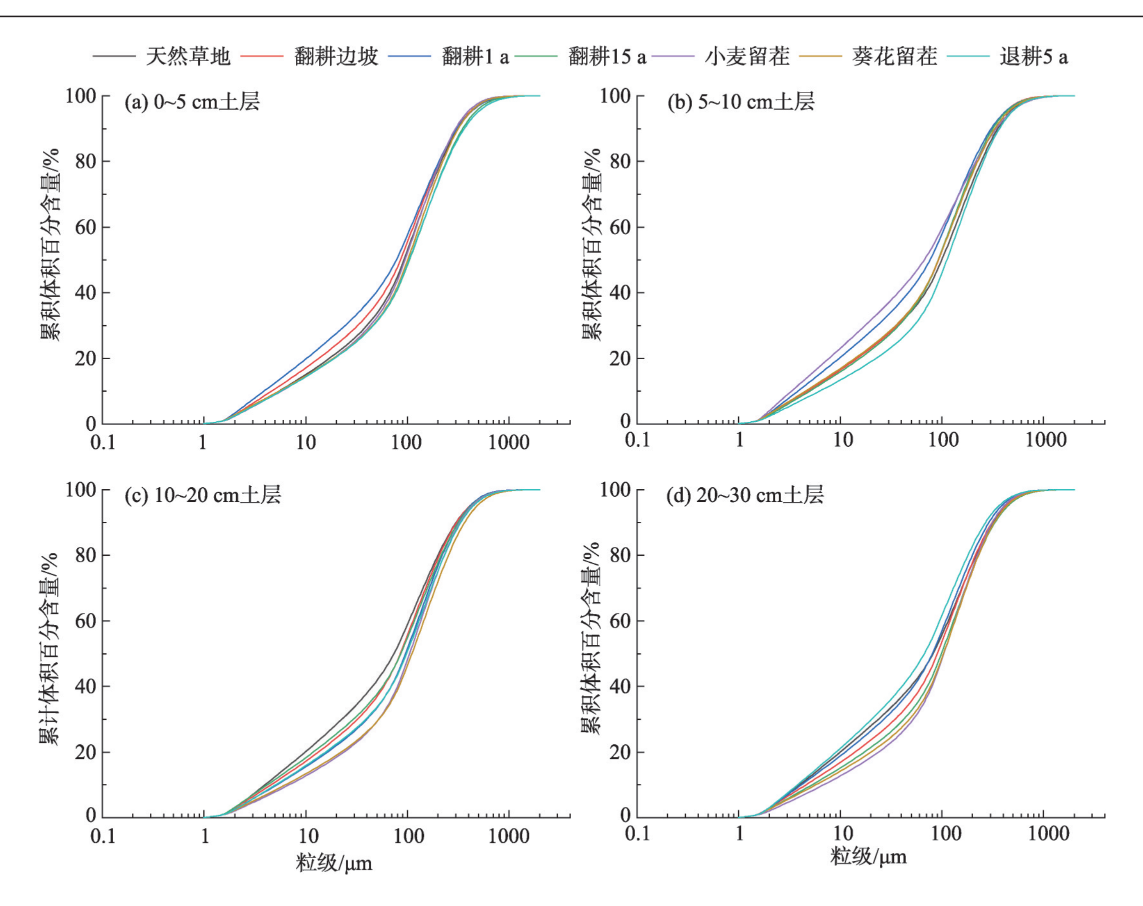


图3　同一土层不同耕作方式下土壤粒度累积频率分布

Fig. 3　Distribution curve of soil grain size accumulation frequency under different tillage methods in the same soil layer

绝大部分存在100 μm之后；在20~30 cm土层内，各样地间颗粒分布程度差距明显，退耕5 a分布最均匀。总体上看，各样地之间的粒度组成差异不大。

3　讨 论

本研究对阴山北麓农牧交错带不同耕作方式下农田土壤粒径进行分析可知，各样地土壤均以细砂含量最大，为25.81%~39.56%，粗砂含量最低，为0.62%~2.87%，土壤颗粒各粒级比例差异较大。这与苑依笑等[36]研究在风蚀作用下农田土壤粒径黏粒、粉砂含量下降；土壤平均粒径增大的研究结果相似。但粒径变化的程度还存在一定的差异，这是由于本试验样地的走向与主风向平行，翻耕产生的地垄并没有起到增大地表粗糙度的作用，反而受到大风吹蚀，加剧了翻耕地细粒物质的流失。同时，本研究中0~5 cm表层土壤内，小麦留茬和葵花留茬样地的细砂含量明显高于翻耕地，这是由于在秋天农作物收获后采取留茬覆盖的耕作措施，土壤中细颗粒得以就地保留下来。翻耕农田地表裸露，导致表土细粒物质极易被吹蚀，从而形成了粗粒化的趋势，这与王仁德等[37]的研究结果留茬地地表的细粒物质相对较多，翻耕不耙平地次之，翻耕耙平地最小基本一致。整体来看，翻耕地各土层粒度分布更为均匀，经野外实地调查，每年翻耕深度约在25~30 cm左右，翻耕后，将底土翻耕至地表，使耕地各土层的颗粒组成始终保持在相对均匀的水平，并随着耕作年限的增加，可以明显看出，细粒物质含量在大幅减少，这可能是由于常年翻耕吹蚀原因导致的。留茬地相比退耕地，秋收之后，冬季整个处于非耕作期的农田，采取留茬覆盖的保护模式，有效地防止了土壤细粒物质被风吹蚀携走，显著提高了土壤的抗风蚀能力[38]。

阴山北麓农牧交错带气候干旱少雨，常年耕作活动对土壤的扰动使得土壤结构松散，极易发生风蚀[39]，尤其冬季，风力强劲又大面积缺乏地表覆盖，最终导致土壤逐渐粗化。经过长期的改进和研究，留茬地有利于截留气流中的细粒物质，农作物的高度和盖度增加了地表粗糙度，致使近地表气流对于

农田表层土壤的冲刷吹蚀能力大大降低,从而对土壤表层中的细粒物质产生了一定的保护作用[40]。由表4粒度参数分布特征可知,不同耕作方式下各土层粒度参数差异均较小,整体标准偏差分选较差;土壤偏度在-0.09~0.25,为正偏,细粒物质占比大于粗粒物质;土壤峰度各样地均为宽平态,各土层粒度较为分散。

进一步对不同耕作方式下农田土壤颗粒频率曲线分析(图2)可知,各土层不同耕作方式下土壤均在130 μm出发生交叉,土壤粒径组分中的细砂粒(100~250 μm)组分在此处被分为100~130 μm、130~250 μm两部分。在0~5 cm土层中,前半段(100~130 μm)较细部分颗粒翻耕1 a>翻耕边坡>天然草地>小麦留茬>翻耕15 a>葵花留茬>退耕5 a,而细砂粒的后半段部分较粗颗粒(130~250 μm)表现出来完全相反的结果,这使得细砂粒前后两部分得以相互补充,含量整体差异缩小。岳高伟等[41]研究发现,120~140 μm粒级范围内的土壤颗粒最易受风影响而被吹蚀。同时,各土层土壤颗粒频率曲线显示,在200~400 μm间,各曲线差距较大,从累积频率曲线也可以看出,在200~400 μm,曲线明显变陡,土壤颗粒粒度变化显著,可认为200~400 μm颗粒也易被风蚀。李晓丽等[42]研究认为,阴山北麓农牧交错带农田耕地表层土壤颗粒受气流影响,发生跃移,主要集中在75~200 μm和250~425 μm 2个粒级范围,这与本研究结果基本吻合。

综上所述,不同的耕作方式促使土壤环境和土壤颗粒含量发生相对改变,是造成土壤粒度粗化的根本原因。翻耕地农田地表裸露,经过风蚀,细颗粒被风带走,翻耕使各土层土壤均匀混合,各土层土壤粒径相对均匀;留茬地有效保护了农田表层土壤,因农作物及盖度不同也出现了不同的保护效果。因此排序结果可以为后续当地农田生产后的耕作方式的选择提供合理科学依据,反映了天然草地被利用开垦为农田后的实际情况,为土地自然修复提供理论依据。

4 结 论

(1)不同耕作方式下农田土壤粒度组成各土层均以细砂、极细砂、粉粒为主,占比达到总含量的80%~85%。常年的翻耕使得细粒物质大量被吹蚀,并且细颗粒无法得到补充,进而农田土壤粗化,留茬措施有效的拦截了细粒物质的流失。土壤粒度组成由细到粗为:翻耕1 a>天然草地>翻耕边坡>小麦留茬>翻耕15 a>退耕5 a>葵花留茬。沙粒平均粒径为2.12~2.61。土壤分选性均表现较差,偏度均表现为正偏且接近对称,峰度属于宽平态。

(2)粒度累积分布曲线整体反映出翻耕地风沙活动较留茬地频繁、强烈。耕作方式及农作物的选择决定着其防风固沙功能的大小,进而影响其表层土壤的粒度分布特征。研究区土壤粒径在200~400 μm之间,为易风蚀颗粒。各粒度参数显示不同耕作方式下的农田均在引起土壤的粗化,土壤粒径分布范围较大,粒径整体趋于粗粒化。

参考文献(References):

[1] 刘孟竹,张红娟,任贺宇,等.退耕还林背景下北方农牧交错带土壤保持功能时空变化[J].水土保持研究,2021,28(5):172-178.[Liu Mengzhu, Zhang Hongjuan, Ren Heyu, et al. Spatiotemporal variations of the soil conservation in the agro-pastoral ecotone of northern China under grain for green program[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 172-178.]

[2] 杜雅仙,樊瑾,李诗瑶,等.荒漠草原不同植被微斑块土壤粒径分布分形特征与养分的关系[J].应用生态学报,2019,30(11):3716-3724.[Du Yaxian, Fan Jin, Li Shiyao, et al. Fractal dimension characteristics of soil particle size distribution under different vegetation patches in desert steppe and its relationship with soil nutrients[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11): 3716-3724.]

[3] 高君亮,罗凤敏,高永,等.农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报,2019,39(15):5594-5602.[Gao Junliang, Luo Fengmin, Gao Yong, et al. Ecological soil C, N, and P stoichiometry of different land use patterns in the agriculture-pasture ecotone of northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5594-5602.]

[4] 戴路炜,唐海萍,张钦,等.北方农牧交错带多伦县生态系统服务权衡与协同关系研究[J].生态学报,2020,40(9):2863-2876.[Dai Luwei, Tang Haiping, Zhang Qin, et al. The trade-off and synergistic relationship among ecosystem services: A case study in Duolun County, the agro-pastoral ecotone of northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2863-2876.]

[5] 苏永中,杨荣,刘婷娜.施肥对新垦绿洲风沙土肥力及碳积累的影响[J].中国沙漠,2019,39(3):1-6.[Su Yongzhong, Yang Rong, Liu Tingna. Effects of long-term different fertilization on soil fertility and soil organic carbon accumulation in psamments of oasis farmland[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(3): 1-6.]

[6] 郑顺安,刘代丽,章明奎,等.长期秸秆还田对污染农田土壤与农产品重金属的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):354-359.

[Zheng Shun'an, Liu Daili, Zhang Mingkui, et al. Effects of long-term straw returning on heavy metals of soil and agricultural products in the polluted farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 354–359.]

[7] 张鑫, 宁小莉, 佟宝全. 阴山北麓农牧交错区居民点空间分异特征——以包头市达尔罕茂明安联合旗为例[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(5): 78–84. [Zhang Xin, Ning Xiaoli, Tong Baoquan. Spatial differentiation of residential areas in the farming-pastoral ecotone on the north foot of Yinshan Mountain[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(5): 78–84.]

[8] 郭挺, 徐先英, 柴成武, 等. 民勤绿洲-荒漠过渡带微区土壤水分及粒度特征研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(5): 157–163. [Guo Ting, Xu Xianying, Chai Chengwu, et al. Soil moisture and grain size characteristic of micro-area in oasis-desert of Minqin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(5): 157–163.]

[9] 樊立娟, 胡广录, 廖亚鑫, 等. 河西走廊斑块植被区表层土壤粒径及其分形维数的空间变异特征[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1068–1075. [Fan Lijuan, Hu Guanglu, Liao Yaxin, et al. Spatial variability of soil particle size and its fractal dimensionof patchy vegetation in Hexi Corridor[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(6): 1068–1075.]

[10] 贾萌萌, 张忠良, 雷加强, 等. 塔里木沙漠公路防护林地土壤粒径分布的分形特征[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 674–679. [Jia Mengmeng, Zhang Zhongliang, Lei Jiaqiang, et al. Fractal characteristics of soil particle size distribution in protection forest of Tarim Desert highway[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4): 674–679.]

[11] Sun C, Liu G, Xue S. Natural succession of grassland on the Loess Plateau of China affects multifractal characteristics of soil particle-size distribution and soil nutrients[J]. Ecological Research, 2016, 31(6): 891–902.

[12] 王敬哲, 丁建丽, 王飞, 等. 艾比湖湿地不同盐渍化土壤粒度组成及可蚀性研究[J]. 土壤, 2018, 50(3): 598–605. [Wang Jingzhe, Ding Jianli, Wang Fei, et al. Particle size distribution (PSD) and erodibility of soils under different salinization degrees in Ebinur Lake Wetland[J]. Soils, 2018, 50(3): 598–605.]

[13] 杜海燕, 周智彬, 刘凤山, 等. 绿洲化过程中阿拉尔垦区土壤粒径分形变化特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 615–622. [Du Haiyan, Zhou Zhibin, Liu Fengshan, et al. Variation of fractal dimension of soil particle size distribution in the Aral reclamation area in oasis development[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(4): 615–622.]

[14] 徐志伟, 鹿化煜. 毛乌素沙地风沙环境变化研究的理论和新认识[J]. 地理学报, 2021, 76(9): 2203–2223. [Xu Zhiwei, Lu Huayu. Aeolian environmental change studies in the Mu Us Sandy Land, North-central China: Theory and recent progress[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(9): 2203–2223.]

[15] Li Y, Kalnay E, Motesharrei S, et al. Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rainand vegetation. Science, 2018, 361(6406): 1019–1022.

[16] Abell J T, Pullen A, Lebo Z, et al. A wind-albedo-wind feedback driven by landscape evolution[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 96.

[17] Huang J P, Li Y, Fu C B, et al. Dryland climate change: Recent progress and challenges[J]. Reviews of Geophysics, 2017, 55(3): 719–778.

[18] 李胜龙, 李和平, 林艺, 等. 东北地区不同耕作方式农田土壤风蚀特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 110–118, 220. [Li Shenglong, Li Heping, Lin Yi, et al. Effects of tillage methods on wind erosion in farmland of northeastern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 110–118, 220.]

[19] 胡静霞, 杨新兵. 我国土地荒漠化和沙化发展动态及其成因分析[J]. 中国水土保持, 2017, 38(7): 55–59, 69. [Hu Jingxia, Yang Xinbing. Development trend and cause of formation of land desertification and sandification in China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2017, 38(7): 55–59, 69.]

[20] Donald Margaret R, Hazelton Pamela A, Clements Anne Marie. Potential for using soil particle-size data to infer geological parent material in the Sydney Region[J]. Soil Research, 2013, 51(4): 301–310.

[21] 王少博, 曹亚倩, 冯倩倩, 等. 保护性耕作对棕壤粒径分形特征及碳氮比分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5): 792–804. [Wang Shaobo, Cao Yaqian, Feng Qianqian, et al. Impacts of conservation tillage on soil particulate composition and distribution of soil carbon and nitrogen in brown soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(5): 792–804.]

[22] Liu X, Zhang G C, Wang Y Q, et al. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China[J]. Geoderma, 2009, 154(1): 123–130.

[23] 李玄姝, 常春平, 王仁德. 河北坝上土地利用方式对农田土壤风蚀的影响[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 23–28. [Li Xuanshu, Chang Chunping, Wang Rende. Influence of land use ways on the farmland soil wind erosion in Bashang area, Hebei, China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 23–28.]

[24] 祁帅, 汪季, 党晓宏, 等. 3种低立式沙障内表层沉积物粒度特征研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 875–881. [Qi Shuai, Wang Ji, Dang Xiaohong, et al. Grain size characteristics of surface sediments in three low vertical sand barriers[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 875–881.]

[25] Yan Y C, Xin X P, Xu X L, et al. Quantitative effects of wind erosion on the soil texture and soil nutrients under different vegetation coverage in a semiarid steppe of northern China[J]. Plant and Soil, 2013, 369(1/2): 585–598.

[26] 葛拥晓, 马龙, 张登清. 新疆艾比湖干涸湖底沉积物粒径分布及其对风蚀的响应[J]. 干旱区研究, 2014, 31(4): 636–642. [Ge Yongxiao, Ma Long, Zhang Dengqing. Response of granularity distribution to wind erosion in the playa of the Ebinur Lake, Xinjiang, Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(4): 636–

642.]

[27] 王燕, 蒙仲举, 丁延龙, 等. 基于多重分形的半干旱区农田表层土壤粒径分布特征研究[J]. 土壤, 2018, 50(4): 826-831. [Wang Yan, Meng Zhongju, Ding Yanlong, et al. Study on particle size distribution characteristics of farmland soil in semi-arid region based on multi-fractal[J]. Soils, 2018, 50(4): 826-831.]

[28] 邱捷, 王洪德, 郑一鹏, 等. 海涂围垦区不同土地利用类型土壤颗粒分形特征[J]. 农业现代化研究, 2020, 41(5): 882-888. [Qiu Jie, Wang Hongde, Zheng Yipeng, et al. Fractal features of soil particles under different land uses in a coastal reclamation area[J]. Research of Agricultural Modernization, 2020, 41(5): 882-888.]

[29] 崔晓. 冀北山地接坝区农田保护性耕作布设及其对土壤理化性质的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2019. [Cui Xiao. Layout of Farmland Conservation Tillage and Its Impacts on Soil Physical and Chemical Properties in Jieba Mountainou Area in Northern Hebei Province, China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.]

[30] 许艳, 张仁陟. 陇中黄土高原不同耕作措施下土壤磷动态研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 670-681. [Xu Yan, Zhang Renzhi. Dynamics of soil phosphorus as affected by tillage on the Loess Plateau in central Gansu, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(3): 670-681.]

[31] 刘汉涛. 阴山北麓保护性耕作地表抗风蚀效果的试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006. [Liu Hantao. An Experimental Study of Anti-Wind Erosion Capacity of Connservation Farming System in the Northern Foot of Yinshan Mountain[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2006.]

[32] 李晓佳, 海春兴, 刘广通. 阴山北麓不同用地方式下春季土壤可蚀性研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30(6): 926-932. [Li Xiaojia, Hai Chunxing, Liu Guangtong. Spring soil erodibility for different land use patterns in the north piedmont of the Yinshan Mountains [J]. Arid Land Geography, 2007, 30(6): 926-932.]

[33] Mohammadi M H, Meskini-Vishkaee F. Predicting soil moisture characteristic curves from continuous particle-size distribution data[J]. Pedosphere, 2013, 23(1): 70-80.

[34] Hu H C, Tian F Q, Hu H P. Soil particle size distribution and its relationship with soil water and salt under mulched drip irrigation in Xinjiang of China[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(6): 1568-1574.

[35] 童春元, 李钢铁, 卢立娜, 等. 杨树低效林下土壤粒径分布与分形特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 308-315. [Tong Chunyuan, Li Gangtie, Lu Li'na, et al. Distribution of soil size and fractal characteristics under low-efficiency poplar forests[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 308-315.]

[36] 苑依笑, 王仁德, 常春平, 等. 坝上地区不同年限退耕工程对土壤的保护作用[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(9): 84-89. [Yuan Yixiao, Wang Rende, Chang Chunping, et al. Protective effect of cropland conversion with different years on soil in Bashang district, North China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(9): 84-89.]

[37] 王仁德, 肖登攀, 常春平, 等. 改进粒度对比法估算单次农田风蚀量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 278-285. [Wang Rende, Xiao Dengpan, Chang Chunping, et al. Estimation on farmland soil loss by single wind erosion using improved particle-size distribution comparison method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 278-285.]

[38] 南岭, 杜灵通, 展秀丽. 土壤风蚀可蚀性研究进展[J]. 土壤, 2014, 46(2): 204-211. [Nan Ling, Du Lingtong, Zhan Xiuli. Advances in study on soil erodibility for wind erosion[J]. Soils, 2014, 46(2): 204-211.]

[39] 高天明, 张瑞强, 黄建国. 开垦对阴山北麓农牧交错区草原坡地的破坏作用[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(1): 125-130. [Gao Tianming, Zhang Ruiqiang, Huang Jianguo. Damage of reclamation on grassland slope in farming pastoral interleaving areas, North Yinshan Mountains[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(1): 125-130.]

[40] 杨立辉, 叶玮, 郑祥民, 等. 河漫滩相沉积与风成沉积粒度判别函数的建立及在红土中应用[J]. 地理研究, 2014, 33(10): 1848-1856. [Yang Lihui, Ye Wei, Zheng Xiangmin, et al. The discriminant function with grain size of floodplain and aeolian sediments and its application in the quaternary red clay[J]. Geographical Research, 2014, 33(10): 1848-1856.]

[41] 岳高伟, 贾慧娜, 蔺海晓. 土壤风蚀过程颗粒释放机理研究[J]. 干旱区地理, 2012, 35(2): 248-253. [Yue Gaowei, Jia Huina, Lin Haixiao. Release mechanism of soil particles in soil wind erosion [J]. Arid Land Geography, 2012, 35(2): 248-253.]

[42] 李晓丽, 申向东. 裸露耕地土壤风蚀跃移颗粒分布特征的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 74-77. [Li Xiaoli, Shen Xiangdong. Experimental study on the distribution characteristics of the saltation particle of aeolian sediment in bare tillage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(5): 74-77.]

Distribution characteristics of soil particle size in farming-pastoral ecotone: A case study of Wuchuan County in Inner Mongolia

FU Dongsheng[1], REN Xiaomeng[2], WANG Yanling[3], ZHANG Cuiying[4], MENG Zhongju[1]

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Meteorological Institute, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 3. Water Conservancy Development Center, Xilin Gol League Water Conservancy Bureau, Xilinhot 026099, Inner Mongolia, China; 4. Jishengtai Town, Siziwang Banner, Ulanqab City, Inner Mongolia, Ulanqab City, Ulanqab 011826, Inner Mongolia, China)

Abstract: This paper takes different farmland and natural grassland in Wuchuan County, Hohhot, as the research object and adopts the method of combining in-situ field monitoring and indoor test to study the following four types of farmland soils: typical wheat stubble land, sunflower stubble land, plowed land, and abandoned farmland. The wind erosion resistance capability of land under different utilization modes is discussed by analyzing the average particle size, standard deviation, skewness, and kurtosis. Research results show the following: (1) The soil in the study area is dominated by fine sand, very fine sand, and silt, accounting for 80% to 85%. (2) The soil particle size composition from fine to coarse is as follows: tillage 1 a > natural grassland > tillage slope > wheat stubble > tillage 15 a > abandoned 5 a > sunflower stubble. Meanwhile, the average particle size of sand is 2.12−2.61. (3) The soil sorting capability of each layer is poor, the skewness is positive and nearly symmetrical, and the kurtosis belongs to the broad flat. The particle size range of soil that is prone to wind erosion is between 200 and 400 μm. (4) Compared with natural grassland, farmland reclamation and utilization lead to the expansion of soil particle size distribution, and the overall particle size is coarse.

Keywords: farming-pastoral ecotone; farmland; soil particle size; farming methods; Wuchuan County